台風イベントによる干潟生物分布の変化と 地盤環境適合場の検証

佐々 真志¹・梁 順普²・渡辺 啓太³

¹ 正会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: sassa@ipc.pari.go.jp

² 非会員 (国研) 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 動土質研究グループ研究官

E-mail: yan-s2@pari.go.jp

³ 非会員 国土交通省 北陸地方整備局 港湾空港部 港湾事業企画課

(〒950-8801 新潟県新潟市中央区美咲町 1-1-1)

本論文では、干潟生物動態・分布における土中水分張力を担うサクションを核とした地盤環境適合場の役割に関する著者らのこれまでの研究基盤に照らして、台風イベントに伴う干潟生物動態と地盤環境動態の一体調査および分析を行った結果について記述・考察している。特に、大きな地盤環境変化に伴う生物動態と分布変化が、生態地盤学の知見・予測と見事に整合するかたちで定量的に発現することを始めて明らかにした。又、生物間相互作用の影響を合せて示した。

Key Words : *geoenvironmental dynamics, tidal flat, ecological geotechnics, suction, typhoon*

1. はじめに

海の生物多様性は、人類がその恵みを享受し持続的に発展していくために重要である一方、その保全・回復を実現するには基盤となる知見が大きく欠けていることが課題となっている¹⁾。実際、豊かな海のシンボリック的存在である干潟を主とした潮間帯は、これまで生態系や水質・水理環境を主として、国内外で活発に研究がなされ多くの知見が蓄積されている²⁾¹⁷⁾。しかし、多種多様な底生生物が生息する地盤表層の土砂環境動態ならびにこれと生物活動とのリンクについては、従来研究が実質的に進んでおらず理解が乏しく留まっていた背景があった。

筆者らは、上記隘路を切り開くために、干潟及び砂浜の地盤表層の土砂環境場を体系的に捉えうるモニタリング・評価手法を開発し、観測・実験・解析の協働によって、波の遡上や潮汐作用下の地下水位変動に伴う土砂内部のサクションの動態が、生物住環境を形成する上で本質的な役割を担っており、土砂の間隙、剛性、硬さ等の生物住環境の顕著な時間的空間的变化を引き起こしていることを明らかにしている^{18),19)}。このようなサクション動態による土砂収縮とせん断強度の増加は、地形動態²⁰⁾や堆積構造の形成²¹⁾にも重要な役割を果たしており、サクションを核とした地盤環境動態が多様な生物活動の適合・限界場を支配していることが分かってきている²²⁾²⁵⁾。

また、上述のような生態地盤学の展開により構築・開発した多種多様な生物住環境診断チャートならびに安定地形の最適設計は、全国各地の干潟・砂浜の生物生息分布と良く整合するとともに、複数の干潟・浅場造成事業での検証を通じて有効性が実証されている²⁶⁾。

一方、多様な生物が生息する水際地盤は、地震・津波等のイベントにより大きく流動しうる²⁷⁾。実際、干潟の生物生態は、日々の干満に伴う環境動態とともに、台風等のイベント過程にも適応する必要がある、常時・イベント時を通じてその生物動態を評価予測しうる基盤の整備が望まれている。すなわち、生物多様性および生態系の保全・再生を有効に実現するには、生物生息場としての地盤環境の適切な理解とこれに立脚した科学技術体系が重要不可欠である。

本研究では、イベント過程を踏まえた沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発を念頭に、常時及び台風イベントによる干潟生物動態・分布を、地盤環境動態・適合場の観点から調査しその適用性を検証することを目的としている。

2. 調査干潟と台風経路及び地形・粒度動態

本研究の調査対象干潟である那覇干潟(瀬長島地先)と名蔵アンパル干潟の場所を、両干潟直上又は近傍を通

図-1 平成 27 年台風 6 号および台風 15 号の台風経路

過した2015年5月の台風6号及び同年8月の台風15号の台風経路とともに図-1に示す。現地調査は、各台風が通過した5～7日後に、上述の砂質干潟の典型的な巣穴生物であるコメツキガニを対象として実施した。具体的には、上記両干潟における岸沖沿岸両方向の地盤高・地下水位・サクションの変化と生物分布・密度に関する生物動態―地盤環境動態の平面一体調査を実施し、同分析結果を2011年～2012年の両干潟で実施した常時（2, 3月の晴天時）の結果と比較した。ここに、沖縄の2, 3月は、台風シーズンから半年以上経った穏やかな天候が続く季節に対応している。この際、台風イベントに伴う地形・地盤高の変化を、ネットワーク型RTK方式（VRS）によるGNSS測量を通じて評価した。上記2つの台風イベントに伴う両干潟での地形・地盤高コンターを図-2に示す。同図には、各調査地点を含む岸沖沿岸両方向の測線（A-A'、B-B'）上の地形断面図も合わせて示している。

台風後、那覇干潟では、沖側で侵食、岸側で堆積し、名蔵アンパル干潟では、全体的に侵食の傾向となり、これに対応して、各干潟の粒度も変化した。同イベントに伴う両干潟の粒度分布を図-3に示す。那覇干潟では、沖側で侵食された細砂が岸側に堆積した結果、岸側の粒度が細粒化していた。一方、名蔵アンパル干潟では、全体的に侵食された結果、粗粒化したことがみてとれる。

図-2 台風イベントに伴う両干潟の地形・地盤高コンター図と断面図：(a) 那覇干潟，(b) 名蔵アンパル干潟

3. 台風イベントによる干潟生物分布の変化と地盤環境適合場の検証

本節では、上述の那覇干潟（瀬長島地先）及び名蔵アンパル干潟において、砂質干潟の典型的な巣穴生物であるコメツキガニを対象として実施した2015年5月の台風6号及び同年8月の台風15号に伴う生物動態の調査結果について考察する。

両干潟における常時のサクシオンと生物個体密度の関係を図-4に示す。本結果から、同生物分布はサクシオン1kPaで明瞭なピークを有していることがわかる。当該サクシオン値は、同生物の巣穴住活動の最適場に対応して

図-3 台風イベントに伴う両干潟の粒度分布

図-4 両干潟の生物密度とサクシオンの関係：常時

図-5 台風イベントに伴う地盤高・地下水位・サクシヨンの変化：那覇干潟

図-6 台風イベントに伴う生物密度-サクシヨンの関係：那覇干潟

図-7 台風イベントに伴う地盤高・地下水位・サクシヨンの変化：名蔵アンパル干潟

図-8 台風イベントに伴う生物密度-サクシヨンの関係：アンパル干潟

おり、また、同生物が、サクシジョンの空間分布を探知・移動し生息分布を形成することを、地盤環境を制御した室内実験結果ならびに現地調査結果と生物動態—地盤環境動態のリンクモデルの連携により明らかにしている²⁹⁾。このような生態地盤学の知見を台風イベント下で詳しく検証した。

那覇干潟における台風6号及び15号後の地盤高・地下水位・サクシジョンの変化を図-5に示している。観測地点は6地点であり、図-5(a)の結果から、台風イベントに伴って、地盤高は大きく変動し、地点によって最大40cm堆積、20cm侵食したことがわかる。これに対応して、サクシジョン分布も大きく変化し(図-5(b))、上述の同生物の最適地盤環境場(サクシジョン1kPa)が、5月の地点2近傍から、8月には地点6近傍へと空間的に顕著にシフトしたことがわかる。この際、同等のサクシジョン場でも、地盤高は大きく異なっていることに注意する。

図-6は、対応する生物個体密度(平均値±SE)とサクシジョン動態の関係を示している。本結果から、上述の生態地盤学の知見と見事に整合するかたち、すなわち、台風6号直後の5月には、上記最適場に対応する地点2で、台風15号直後の8月には、当該イベント過程により新た

図-9 名蔵アンパル干潟のエイの摂餌行動の痕跡

図-10 名蔵アンパル干潟のエイの密度分

に生じた上記最適場に対応する地点6で、顕著な個体群集のピークが得られていることがわかる。

これらの事実は、Sassa and Watabe (2008)と佐々ら(2010)の研究結果を踏まえると、当該干潟生物が、台風イベント後、数日スケール以内の短期間において地盤環境動態・変化を感知し、新たな生息分布を生物固有の適合地盤環境場に形成することを如実に示している。

アンパル干潟における台風6号及び15号後の地盤高・地下水位・サクシジョンの変化を図-7に示す。観測地点は9地点であり、図-7(a)より台風イベントに伴って同全域が侵食されたことがわかる。対応する生物個体密度(平均値±SE)とサクシジョン動態の関係を図-8に示す。本結果から、台風6号直後の5月には、上述の最適地盤環境場が得られる地点7及び9で顕著な個体群集のピークが現れていることがわかる(図-7(b))。

一方、台風15号後の8月には、最適地盤環境に対応する地点9, 4, 5の内、地点5のみ低い生息密度であった。当該地点は、同干潟の当年夏期のエイによる底生生物の摂餌(図-9)場所と一致していたことが、同干潟におけるエイの密度分布の調査結果(図-10)から判明しており、当該生物間相互作用の影響が明らかとなった。

4. 結論

水と地盤と生態を融合した学際新領域「生態地盤学」の展開に基づく沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発の一環として、干潟生物動態・分布におけるサクシジョンを核とした地盤環境適合場の役割に関する既往の知見に照らして、常時及び台風イベントに伴う干潟生物動態と地盤環境動態の一体調査および分析を行った。その結果、大きな地盤環境変化に伴う生物動態と分布変化が、生態地盤学の知見・予測と見事に整合するかたちで定量的に発現することをはじめて明らかにした。また、生物間相互作用の影響を合せて示した。

謝辞：本研究は、科研費基盤研究(A)「沿岸底生生態—地盤環境動態の統合評価予測技術の開発」(代表：佐々，課題番号 JP15H02265)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) COP10: 生物多様性条約第10回締結国会議 (COP10), 2010.
- 2) Altevogt, R. : Some studies on two species of Indian fiddler crabs, *Uca marionis* (Dana) and *U. annulipes* (Latr.), *J. Bombay Nat. Hist. Soc.*, Vol. 52, pp. 702-716, 1955.
- 3) Icely, J.D. and Jones, D.A. : Factors affecting the distribution of the genus *Uca* (Crustacea: Ocypodidae) on an East African shore, *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, Vol. 6, No. 3, pp. 315-325, 1978.
- 4) Amos, C.L., Wagoner, N.A.V. and Daborn, G.R. : The influence of subaerial exposure on the bulk properties of fine-grained intertidal sediment from Minas Basin, Bay of Fundy, *Estuar. Coast.*

- Shelf Sci.*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-13, 1988.
- 5) Koga, T., Henmi, Y. and Murai, M. : Sperm competition and the assurance of underground copulation in the sand-bubbler crab *Scopimera globosa* (Brachyura: Ocypodidae), *J. Crustac. Biol.*, Vol. 13, No. 1, pp.134-137, 1993.
 - 6) McLachlan, A., Jaramillo, E., Donn, T.E. and Wessels, F. : Sandy beach macroinfauna communities and their control by the physical environment: a geographical comparison, *J. Coast. Res.*, Vol. 15, pp. 27-38, 1993.
 - 7) Dugan, J.E., Hubbard, D.M. and Lastra, M. : Burrowing abilities and swash behaviour of three crabs, *Emerita analoga* Stimpson, *Blepharipoda occidentalis* Randall and *Lepidopa californica* Eford (Anomura, Hippoidea), of exposed sandy beaches, *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, Vol. 255, No. 2, pp.229-245, 2000.
 - 8) 和田恵次 : 干潟の自然史, Ecological Sciences, 205p., 2000.
 - 9) Botto, F. and Iribarne, O. : Contrasting effects of two burrowing crabs (*Chasmagnathus granulata* and *Uca uruguayensis*) on sediment composition and transport in estuarine environments, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 51, No. 2, pp. 141-151, 2000.
 - 10) 国土交通省(MLIT)港湾局 : 海の自然再生ハンドブック, 第2巻, 干潟編, 138p., 2003.
 - 11) Kuwae, T., Kibe, E. and Nakamura, Y. : Effect of emersion and immersion on the porewater nutrient dynamics of an inter-tidal sandflat in Tokyo Bay, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 57, No. 5-6, pp. 929-940, 2003.
 - 12) Brazeiro, A. : Geomorphology induces life history changes in invertebrates of sandy beaches: the case of the mole crab *Emerita analoga* in Chile, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, Vol. 85, No. 1, pp. 113-120, 2005.
 - 13) Tamaki, A., Nakaoka, A., Maekawa, H. and Yamada, F. : Spatial partitioning between species of the phytoplankton-feeding guild on an estuarine intertidal sand flat and its implication on habitat carrying capacity, *Estuar. Coast. Shelf Sci.*, Vol. 78, No. 4, pp. 727-738, 2008.
 - 14) 大串隆之, 近藤倫生, 野田隆史 : メタ群集と空間スケール, シリーズ群集生態学 5, 185p., 2008.
 - 15) Compton, T.J., Troost, T.A., Drent, J., Kraan, C., Bocher, P., Leyrer, J., Dekinga, A. and Piersma, T. : Repeatable sediment associations of burrowing bivalves across six European tidal flat systems, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 382, pp. 87-98, 2009.
 - 16) Palmer, M.A. and Filoso, S. : Restoration of ecosystem services for environmental markets, *Science*, Vol. 325, pp. 575-576, 2009.
 - 17) Schlacher, T.A. and Thompson, L. : Environmental control of community organisation on ocean-exposed sandy beaches, *Mar. Freshwater Res.*, Vol. 64, No. 2, pp. 119-129, 2013.
 - 18) Sassa, S. and Watabe, Y. : Role of suction dynamics in evolution of intertidal sandy flats: Field evidence, experiments, and theoretical model, *J. Geophys. Res.*, Vol. 112, F01003, doi:10.1029/2006JF000575, 2007.
 - 19) Sassa, S., Watabe, Y., Yang, S. and Kuwae, T. : Burrowing criteria and burrowing mode adjustment in bivalves to varying geoenvironmental conditions in intertidal flats and beaches, *PLoS ONE*, Vol. 6, No.9, e25041, 2011.
 - 20) Sassa, S. and Watabe, Y. : Persistent sand bars explained by geodynamic effects, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 36, L01404, doi:10.1029/2008GL036230, 2009.
 - 21) Watabe, Y. and Sassa, S. : Application of MASW technology to identification of tidal flat stratigraphy and its geoenvironmental interpretation, *Mar. Geol.*, Vol. 252, pp. 79-88, 2008.
 - 22) Sassa, S. and Watabe, Y. : Threshold, optimum and critical geoenvironmental conditions for burrowing activity of sand bubbler crab, *Scopimera globosa*, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 354, pp. 191-199, doi:10.3354/meps07236, 2008.
 - 23) Kuwae, T., Miyoshi, E., Sassa, S. and Watabe, Y. : Foraging mode shift in varying environmental conditions by dunlin *Calidris alpina*, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, Vol. 406, pp. 281-289, 2010.
 - 24) Sassa, S., Watabe, Y., Yang, S. and Kuwae, T. : Ecological geotechnics: Role of waterfront geoenvironment as habitats in the activities of crabs, bivalves, and birds for biodiversity restoration, *Soils Found.*, Vol. 53, No.2, pp. 246-258, 2013.
 - 25) Sassa, S., Yang, S., Watabe, Y., Kajihara, N. and Takada, Y. : Role of suction in sandy beach habitats and the distributions of three amphipod and isopod species, *J. Sea Res.*, Vol. 85, pp. 336-342, 2014.
 - 26) 佐々真志, 渡部要一, 梁順普, 桑江朝比呂 : 干潟・砂浜海岸の生物生態/地形動態に果たす地盤環境の役割—多種多様な生物住環境診断チャートと安定地形の最適設計—, 港湾空港技術研究所報告, Vol. 52, No.4, pp. 3-44, 2013.
 - 27) Seike, K., Shirai, K. and Kogure, Y. : Disturbance of shallow marine soft-bottom environments and megabenthos assemblages by a huge tsunami induced by the 2011 M9.0 Tohoku-Oki Earthquake, *PLoS ONE*, Vol. 8, No. 6, e65417, 2013.
 - 28) 佐々真志, 渡部要一, 梁順普 : 巣穴底生生物の最適住活動モデルによる土砂環境選択行動とパッチ形成の実証, 土木学会論文集 B2, Vol. 66, No.1, pp. 1096-1100, 2010.

(2017.3.15 受付)

TYPHOON-INDUCED BENTHIC-GEOENVIRONMENTAL DYNAMICS OF INTERTIDAL FLATS AND VERIFICATION OF PREDICTIONS BASED ON ECOLOGICAL GEOTECHNICS

Shinji SASSA, Soonbo YANG and Keita WATANABE

This paper presents and discusses an integrated analysis of benthic-geoenvironmental dynamics associated with multiple typhoon events, with the aim of facilitating a rational predictive framework for coastal eco-geodynamics. The results show that the benthic dynamics of two intertidal flats following the passage of two typhoons manifested themselves in accordance with the predictions based on ecological geotechnics. The findings also illustrate the effect of biological interactions.